



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA SOUČÁSTÍ V ZAKALENÉM STAVU

MACHINING OF HARDENED PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Havlík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Daniel Havlík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Polzer, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba součástí v zakaleném stavu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stále častěji se lze setkat s firmami, které potřebují dokončovacím způsobem obrábět zakalené strojní součásti. Hlavní zaměření této závěrečné práce je na operace soustružení nebo okružovací frézování zakalených hřídelů z materiálů 42CrMoS4 nebo 50CrMo4.

Cíle bakalářské práce:

- teoretický rozbor soustružení zakalených součástí
- teoretický rozbor okružního frézování závitů kuličkových šroubů

Seznam doporučené literatury:

GUPTA, Kapil, ed. Advanced manufacturing technologies: Modern Machining, Advanced Joining, Sustainable Manufacturing. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56-98-4.

DAVIM, J. Paulo, ed. Surface integrity in machining. London: Springer, 2010, 215 s. ISBN 978--84882-873-5.

DAVIM, J. Paulo, ed. Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na výrobu součástí v zakaleném stavu. Začátek práce je věnován rozboru konkrétních materiálů, a to 42CrMo4, 42CrMoS4 a 50CrMo4. Dále je rozebráno tepelné zpracování. Hlavní část této práce tvoří teoretický rozbor soustružení zakalených součástí a teoretický rozbor okružního frézování závitů kuličkových šroubů, kde je popsán i princip kuličkových šroubů.

Klíčová slova

Soustružení, obrábění, okružovací frézování, kuličkový šroub, kalení, 42CrMo4, 42CrMoS4, 50CrMo4.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the machining of hardened parts. The beginning of the work is devoted to the analysis of specific materials, 42CrMo4, 42CrMoS4 and 50CrMo4. Next described thing is heat treatment. The main part of this work consists of theoretical analysis turning of hardened parts and theoretical analysis of the thread whirling of ball screw, where the principle of ball screws is also described.

Keywords

Turning, machining, thread whirling, ball screw, hardening, 42CrMo4, 42CrMoS4, 50CrMo4.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HAVLÍK, Daniel. Výroba součástí v zakaleném stavu [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131795>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Výroba součástí v zakaleném stavu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 20.5.2021

.....

Daniel Havlík

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT.....	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE.....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
ÚVOD	8
1 KONKRÉTNÍ POHLED NA MATERIÁLY 42CrMo4, 42CrMoS4 a 50CrMo4.....	9
1.1 Materiál 42CrMo4	9
1.2 Materiál 42CrMoS4.....	10
1.3 Materiál 50CrMo4	10
1.4 Vlastnosti a vliv nejdůležitějších použitých prvků u těchto ocelí	11
2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	13
2.1 Kalení.....	13
2.2 Kalitelnost, zakalitelnost a prokalitelnost	13
2.3 Kalicí teplota	13
2.4 Kalicí prostředí.....	14
2.5 Způsoby kalení.....	15
2.6 Popouštění.....	16
3 SOUSTRUŽENÍ ZAKALENÝCH SOUČÁSTÍ.....	17
3.1 Teorie soustružení	17
3.2 Teorie soustružení zakalených součástí	22
3.3 Vhodná volba obráběcího stroje.....	24
3.4 Ekonomický aspekt obrábění zakalených součástí	26
3.5 Složky řezných sil při soustružení zakalených součástí.....	27
3.6 Textura obrobené plochy.....	29
4 OKRUŽOVACÍ FRÉZOVÁNÍ ZÁVITŮ KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ	31
4.1 Kuličkové šrouby	31
4.2 Teorie okružovacího frézování.....	34
4.3 Teorie okružovacího frézování závitů	34
4.4 Stroj pro okružovací frézování závitů	35
4.5 Výhody okružovacího frézování	36
ZÁVĚR.....	37
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	38
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	40

ÚVOD

Ve výrobě je stále častěji vyskytovaná potřeba obrábět zakalené strojní součásti. Toho může být dosaženo tradičním způsobem obrábění nebo se využívají moderní způsoby obrábění. Tradičním způsobem obrábění je rozuměno klasické obrobení součásti s přídavkem, následné zakalení a dokončení součásti broušením. Moderní způsob je takový že se součást nejprve zakalí a poté se teprve provádějí obráběcí operace. Tento způsob obrábění přináší sebou mnoho výhod.

Tato bakalářská práce je zaměřena výhradně na operace soustružení a okružní frézování zakalených součástí. Úvodní část této práce tvoří pohled na konkrétní materiály 42CrMo4, 42CrMoS4 a 50CrMo4. Dále je na úvod této práce popsáno tepelné zpracování materiálu, kde je vysvětlen princip a funkčnost kalení. V hlavní části je proveden teoretický rozbor soustružení a okružovacího frézování, u kterých je popsána celková teorie těchto technologií, základní principy, vhodná volba strojů a výhody těchto technologií pro výrobu kuličkových šroubů v zakaleném stavu. V poslední části je popsán teoretický rozbor kuličkových šroubů, jejich provedení a funkčnost.

1 KONKRÉTNÍ POHLED NA MATERIÁLY 42CrMo4, 42CrMoS4 a 50CrMo4

V této kapitole je rozebráno chemické složení všech těchto tří materiálů a jejich mechanické a technologické vlastnosti.

1.1 Materiál 42CrMo4

Chemické složení oceli 42CrMo4 podle normy EN 10083-3 je uvedené v tab. 1.1.

Tab. 1.1 Chemické složení hm. % oceli 42CrMo4 [1].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,38–0,45	max 0,4	0,6–0,9	max 0,025	max 0,035	0,9–1,2	0,15–0,3

Kalení u tohoto typu ocele probíhá za teplot 820–860 °C. Kalicím prostředím je olej nebo voda. Popouštění se provádí za teplot 620–700 °C a ochlazování probíhá na vzduchu nebo řízeně. Obrobitelnost pro soustružení i frézování je u tohoto materiálu 11 b [2, 3].

Mechanické vlastnosti pro ocel 42CrMo4 jsou uvedeny v tab. 1.2.

Tab. 1.2 Mechanické vlastnosti v zušlechtném stavu pro ocel 42CrMo4 a 42CrMoS4 [3].

Průměr tyče [mm]	R_e min. [MPa]	R_m [MPa]	A min. [%]	Z min. [%]	KV min. [J]
$d \leq 16$	900	1100–1300	10	40	35
$16 < d \leq 40$	750	1000–1200	11	45	35
$40 < d \leq 100$	650	900–1200	12	50	35
$100 < d \leq 160$	550	800–950	13	50	35
$160 < d \leq 250$	500	750–900	14	55	35

Vyzobrazená prokalitelnost pro materiál 42CrMo4 a 42CrMoS4 je na obr. 1.1. Na tomto obrázku H znázorňuje normální hodnoty pro celý pás prokalitelnosti, HH je zúžený pás prokalitelnosti směrem k horní hranici a HL znamená zúžený pás prokalitelnosti směrem ke spodní hranici [3].



Obr. 1.1 Křivky prokalitelnosti, vzdálenost plochy od kaleného čela v mm [3].

1.2 Materiál 42CrMoS4

Chemické složení oceli 42CrMoS4 podle normy EN 10083-3 je uvedené v tab. 1.3.

Tab. 1.3 Chemické složení hm. % oceli 42CrMoS4 [4].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,38–0,45	max 0,4	0,6–0,9	max 0,025	0,02–0,04	0,9–1,2	0,15–0,3

Mechanické vlastnosti pro tento typ materiálu jsou uvedeny v tab. 1.2.

Materiál 42CrMoS4 je v podstatě totožný s materiálem 42CrMo4, rozdílem je hlavně v obsahu síry. Díky vyššímu obsahu síry je u materiálu 42CrMoS4 zlepšená obrobitelnost.

Použití ocelí 42CrMoS4 a 42CrMo4

Využití těchto ocelí s vyšší prokalitelností je pro výše namáhané strojní díly, jako v případě této práce hřídel kuličkového šroubu. Po zakalení dosahují tyto oceli tvrdosti přibližně 58 HRC. Po zušlechtnění u součástí do 100 mm lze docílit pevnosti nad 1000 MPa při ještě dostatečné houževnatosti. Nejsou náchylné k popouštění křehkosti. Z důvodu náchylnosti ke vzniku kalících trhlin v místech s vrubových účinkem nebo povrchových vad se kalení provádí do méně razantního kalícího prostředí. Tyto oceli v kaleném stavu dobře odolávají opotřebením [3].

1.3 Materiál 50CrMo4

Chemické složení oceli 50CrMo4 podle normy EN 10083-3 je uvedené v tab. 1.4.

Tab. 1.4 Chemické složení hm. % oceli 50CrMo4 [5].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,46–0,54	max 0,4	0,5–0,8	max 0,025	max 0,035	0,9–1,2	0,15–0,3

Kalení probíhá za teplot 820–860 °C, kalícím prostředím je olej. Mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny v tab. 1.5 [6].

Tab. 1.5 Mechanické vlastnosti oceli 50CrMo4 [6].

Průměr tyče [mm]	R_e min. [MPa]	R_m [MPa]	A min. [%]	Z min. [%]	KV min. [J]
$d \leq 16$	900	1100–1300	9	40	30
$16 < d \leq 40$	780	1000–1200	10	45	30
$40 < d \leq 100$	700	900–1100	12	50	30
$100 < d \leq 160$	650	800–1000	13	50	30
$160 < d \leq 250$	550	800–950	13	50	30

Ocel 50CrMo4 je příbuzná s ocelí 42CrMo4. Tyto dvě oceli kromě prakticky stejné koncentrace chromu a molybdenu, se vyznačují mnohem nižším průměrným obsahem uhlíku v chemickém složení. Ocel 50CrMo4 je využívána pro součásti určené pro vozidla a stroje, které vyžadují vysokou tvrdost a jsou silně namáhány na ohyb, krut, odírání a opotřebení, jako jsou například klikové hřídele, ozubená kola, těžké šrouby, přítlačné válečky atd. [7].

1.4 Vlastnosti a vliv nejdůležitějších použitých prvků u těchto ocelí

Uhlík (C)

Uhlík má významný vliv na vlastnosti ocelí. Zvyšujícím se obsahem uhlíku se zvyšuje především pevnost, tvrdost a zakalitelnost ocelí, na druhou stranu houževnatost a nárazová práce klesají [8].

Křemík (Si)

Silně feritotvorný prvek a do obsahu 0,5 % není považován za legující element, ale pouze za silný dezoxidační prvek. Přísada křemíku zvyšuje pevnostní úroveň feritu a umožňuje eliminovat tvorbu karbidů. Kvůli tomuto má i příznivý vliv na omezení vývinu nízkoteplotní popouštěcí křehkosti [9].

Mangan (Mn)

Silně austenitotvorný prvek, zvyšující pevnost a tvrdost při nízkém snížení tažnosti. Dosahuje výborných dezoxidačních účinků vlivem své vysoké afinity ke kyslíku. Silnější vazbu než se železem má mangan se sírou, takže již v průběhu výroby tavby vznikají v matici oceli sirníky MnS, ty jsou dobře tvářitelné za tepla. Důležitá schopnost manganu spočívá ve zvýšení prokalitelnosti, ale s tím také roste náchylnost k popouštěcí křehkosti. Mangan je rovněž silným segregacním prvkem [9].

Fosfor (P)

Obvykle je fosfor v běžných ocelích nežádoucím prvkem. Fosfor je náchylný k primární segregaci (odměšování) z taveniny a má sklon i k sekundární segregaci, která pro malou difúzní rychlost nelze vyrovnat. Rozpouští se v tuhém roztoku. Chová se podobně jako síra, kdy tvoří nízkotavitelné eutektikum. Fosfor dokáže při nízkém obsahu uhlíku v oceli vyvolat popouštěcí křehkost, zhoršuje vrubovou houževnatost, zvětšuje sklon k lámavosti za studena, zvyšuje přechodovou teplotu, zhoršuje svařitelnost. Ovšem obsah fosforu do 0,06 hm. % ale nemusí být v oceli nebezpečný, obsahuje-li ocel méně než 0,05 hm. % uhlíku [8].

Síra (S)

Síra se dostává do slitin železa převážně z rud a paliva hutnických pecí. Podobně jako fosfor má síra silný sklon k odměšování. Sloučením železa a síry vznikne sulfid železnatý, který se soustřeďuje na obvodu austenitických zrn a oslabuje tak jejich soudržnost. Výsledkem je křehkost při teplotách blízkých teplotě tavení eutektika (985 °C), kde lehko vznikají v oceli mezikrystalické trhliny. Ale síra má i pozitivní vlastnosti, jako je zlepšení obrobitelnosti ocelí. To je způsobeno tím, že jemně rozptýlenými vměstky sirníků je přerušena kovová souvislost hmoty, z níž se při obrábění snadno ulamují krátké třísky [8, 10].

Chrom (Cr)

Patří mezi feritotvorné prvky. Zvyšuje pevnost matrice, korozivzdornost, otěruvzdornost a prokalitelnost. Zvýšení prokalitelnosti ale závisí na rozpustnosti chromových karbidů při austenitizaci, protože zvýšená prokalitelnost je spojena s chromem rozpuštěným v austenitu. Nerozpuštěné karbidy účinkují jako nukleační zárodky, které prokalitelnost oceli snižují. Tyto

karbidy se rozpouštějí při vysokých teplotách. Chrom zvyšuje teplotu A_{c1} , takže oceli s přídavkem Chromu jsou odolnější proti popouštění do teploty 150–550 °C, čímž vytváří předpoklad pro výrobu ocelí se zvýšenými pevnostními charakteristikami. Hrozí výskyt vysokoteplotní popouštěcí křehkosti, která vzniká při pomalém ochlazování z vyšších teplot popouštění. Materiál je nutno ochlazovat ve vodě po pouštění na teplotě pod úrovní popouštěcí křehkosti [9].

Molybden (Mo)

Silný karbidotvorný prvek. Zvyšuje kritickou teplotu růstu austenitického zrna, zvětšuje prokalitelnost, zvláště v kombinaci s chromem. Dále snižuje možnost výskytu vysokoteplotní popouštěcí křehkosti. Zvětšuje také pevnost za tepla, mez tečení, popřípadě tvrdost za tepla a zvyšuje podstatně odolnost oceli proti korozi a chemickým vlivům [10].

2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Tepelné zpracování slouží ke zlepšení nebo získání nových vlastností součástí. Podstatou tepelného zpracování je ohřev materiálu na danou teplotu, která je různá podle druhu tepelného zpracování a podle druhu materiálu, který je tepelně zpracováván. Následuje poté různě pomalé nebo naopak různě rychlé ochlazování materiálu [11].

2.1 Kalení

Kalení je způsob tepelného zpracování, který má za cíl dosáhnout nerovnovážných stavů ocelí. Kalení můžeme rozdělit podle převažující strukturní složky na martenzitické a bainitické. Většinou chceme dosáhnout martenzitické struktury. Výsledkem kalení je dosažení tvrdší struktury a zvýšení odolnosti proti opotřebení [11, 12].

2.2 Kalitelnost, zakalitelnost a prokalitelnost

Kalitelnost je schopnost oceli dosáhnout nerovnovážného strukturního stavu, který je získán při dostatečné rychlosti ochlazování z austenitické teploty. U převážné většiny ocelí lze získat martenzitickou strukturu. Za nekalitelné oceli považujeme vysokolegované oceli u kterých se vyskytuje pouze jediná fáze [13].

Zakalitelnost se hodnotí zpravidla tvrdostí oceli po zakalení. Maximální dosažená hodnota závisí na tvrdosti martenzitu, která hlavně závisí na obsahu uhlíku v austenitu. Zakalitelnost lze vyhodnotit na kterémkoli vzorku oceli, který byl ochlazován nadkritickou rychlostí. Kalitelnost a zakalitelnost jsou materiálové charakteristiky a mimo chemického složení ocelí jsou závislé na stavu austenitu před kalením (velikost zrna, homogenita, přítomnost minoritních fází) [12, 13].

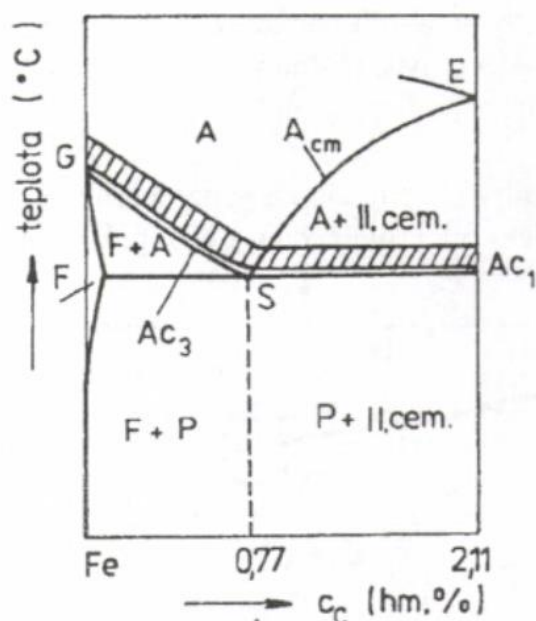
Prokalitelnost je schopnost oceli získat po zakalení tvrdost odpovídající její zakalitelnosti v určité hloubce pod povrchem kaleného předmětu. Závisí na vztahu mezi kritickou rychlostí kalení a skutečnou rychlostí ochlazování uvažovaného objemu. [13].

2.3 Kalicí teplota

Teplota kalení je u podeutektoidních ocelí obvykle 30 až 50 °C nad teplotou A_{c3} (obr 2.1). Takto zvolená teplota má zajistit dosažení struktury homogenního austenitu v co nejkratším čase a zachování jemného austenitického zrna. Po zakalení se v podeutektoidní oceli tedy vyskytuje struktura tvořená jemným tetragonálním martenzitem a malým množstvím zbytkového austenitu [12, 13].

Vyšší teplotu austenitizace lze u jemnozrnných ocelí použít bez nebezpečí zhrubnutí původního austenitického zrna. Původní hrubé austenitické zrno má za důsledek hrubou strukturu martenzitu po zakalení, četnější výskyt kalících mikrotrhlin a nárůst úrovně vnitřního pnutí. Důsledkem těchto změn původní struktury je především pokles houževnatosti, růst tranzitní teploty a větší pravděpodobnost vzniku předčasných zbrzděných lomů [12].

Optimální kalicí teplota nadeutektoidních ocelí dosahuje hodnot 30 až 50 °C nad teplotou A_{c1} . Se zvyšujícím se množstvím zbytkového austenitu klesá uměrně tvrdost. Výsledkem správně zakalené nadeutektoidní oceli je struktura tvořená martenzitem s jistým podílem zbytkového austenitu a nerozpuštěného sekundárního cementitu [13].

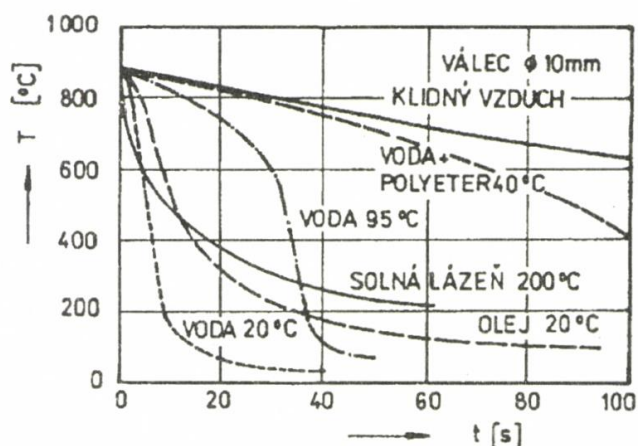


Obr. 2.1 Pásmo kalících teplot v diagramu Fe – Fe₃C [13].

2.4 Kalicí prostředí

Cílem kalení je dosažení martenzitické struktury v předem stanovené části průřezu, ve které musí být rychlost kritická menší než rychlost ochlazování. Za optimální ochlazovací prostředí považujeme takové, které umožňuje ochlazování požadovaného objemu součásti rychlostí jen o málo vyšší než rychlost kritická, příliš velká rychlost ochlazování by znamenala zvýšení úrovně vnitřních teplotních a strukturních pnutí. Naopak příliš pomalá rychlost ochlazování vede k nežádoucí stabilizaci zbytkového austenitu. Znázornění teplot pro válec o průměru 10 mm je na obr. 2.2 [12].

Účinnost ochlazování závisí především na tepelné vodivosti, výparném a měrném teple a také na viskozitě kalicího prostředí. Velikost měrného povrchu předmětu a jeho čistota také ovlivňuje účinnost kalicího prostředí [12].



Obr. 2.2 Ochlazovací křivky středu ocelového válce o průměru 10 mm v uvedených prostředích [12].

2.5 Způsoby kalení

Pro vhodnou volbu způsobu kalení záleží na požadovaných vlastnostech kalené součásti, dále na velikosti tvaru a druhu oceli této kalené součásti. Kalení dělíme na plynulé a přetržité. Plynulé kalení spočívá v tom, že součásti jsou kaleny v pokojové teplotě. Při přetržitém kalení se využívají teplé lázně nebo dvě prostředí o pokojové teplotě s rozdílnou ochlazovací intenzitou [12].

Martenzitické kalení

Nejvyužívanější a nejjednodušší způsob kalení. Takto zakalené součásti se dále popouštějí. Tento způsob kalení je technologicky nenáročný a relativně levný. Spočívá v tom, že po ohřevu na správnou kalicí teplotu následuje okamžitě plynulé ochlazení až na teplotu ochlazovacího prostředí. Nevýhodou je vysoká úroveň vnitřního pnutí zvláště po kalení do vody a následných deformacích až praskání kalených předmětů [12, 13, 14].

Lomené kalení

Lomené kalení neboli přerušované spočívá v rychlém ochlazení do doby, než se teplota kalené součásti zastaví těsně nad M_s , tj. asi 200–400 °C. Kalené těleso se poté přeneso do mírnějšího ochlazovacího média, ve kterém proběhne martenzitická přeměna. Toto vede ke snížení strukturních pnutí. Nevýhoda tohoto způsobu kalení je obtížné měření dosažené teploty v prvním kalicím prostředí [12, 14].

Termální kalení

Účelem je oddělení tepelných a strukturních pnutí a tím zmenšení jejich společného účinku. Součást se ochlazuje v lázni, jejíž teplota je těsně nad teplotou M_s kalené oceli. Těleso zůstává v lázni do té doby, než nastane úplné vyrovnání teplot v celém průřezu. Po tomto vyrovnání teplot se těleso dochladí zpravidla na vzduchu, proběhne martenzitická přeměna. Tento způsob kalení je vhodný zejména pro výrobky zhotovených z legovaných ocelí, nebo pro menší tenkostěnné a tvarově složitě dílce z uhlíkových nebo nízkolegovaných ocelí [13, 14].

Izotermické zušlechťení

Rychlé přenesení kaleného předmětu z kalicí teploty do kalicí lázně. Teplota lázně je v oblasti bainitické přeměny obvykle 300–400 °C. Předmět zůstává v lázni, kde proběhne izotermický rozpad austenitu na bainit, následuje dochlazení na vzduchu. Při tomto způsobu dosahujeme minimální úrovně teplotních a strukturních pnutí, tím je nebezpečí praskání a deformace rovněž minimální. Protože nehrozí nebezpečí deformací a vzniku trhlin, není třeba součást dále popouštět. Mechanické vlastnosti určuje výška teploty izotermického rozpadu austenitu. Tento způsob je vhodný především pro součásti malých průřezů z nízkolegovaných ocelí se střední prokalitelností [13].

Izotermické kalení

Modifikace izotermického zušlechťení, kde je teplota lázně těsně pod teplotou M_s a výslednou strukturu tvoří směs bainitu, martenzitu a zbytkového austenitu [12].

Kalení se zmrazováním

Cílem kalení se zmrazováním je zmenšení množství zbytkového austenitu a tím i zvýšení tvrdosti a zlepšení rozměrové stability. Kvůli zamezení stabilizace zbytkového austenitu je nutné provádět zmrazování neprodleně po kalení [14].

2.6 Popouštění

Popouštěním se rozumí ohřev na popouštěcí teplotu, která je nižší než teplota kalení, výdrž na této teplotě a následné ochlazení vhodnou rychlostí. Popouštění by se mělo provádět ihned po zakalení, z důvodu že vnitřní pnutí mohou vést k popraskání zakaleného předmětu i po vyjmutí z kalící lázně (zbrzděné lomy). Rozhodující vliv na rozsah strukturních změn a souvisejících změn mechanických vlastností má výška popouštěcí teploty. Při popouštění kalené oceli se obvykle rozlišují čtyři stádia popouštění. I když teplotní hranice mezi nimi nelze jednoznačně vymežit, protože jednotlivé pochody se mohou navzájem překrývat [11, 12, 14].

První stádium popouštění (cca do 200 °C). Charakterizuje rozpad silně přesyceného tuhého roztoku tetragonálního martenzitu na nerovnovážný karbid s těsně uspořádanou šesterečnou mřížkou a nízkouhlíkový martenzit [13, 14].

Druhé stádium popouštění (cca 200–300 °C). Probíhá zde rozpad zbytkového austenitu ve strukturu bainitického typu. Změna vlastností v tomto stádiu se týká především zvětšení měrného objemu oceli [13, 14].

Třetí stádium popouštění (nad 250 °C). Vzniká rovnovážný karbid Fe_3C a nízkouhlíkový martenzit se mění v rovnovážný tuhý roztok α (ferit). Při dosažení vyšších teplot dochází k rozpouštění karbidických částic a vzniku kulovitých zrn cementitu. Přeměny v tomto stádiu popouštění jsou doprovázeny výraznou změnou vlastností oceli, snížení tvrdosti, zvětšení tvárnosti a houževnatosti, klesá zbytkové pnutí a zmenšuje se měrný objem. Výsledkem je feriticko-cementitická struktura nazývaná sorbit [13, 14].

Čtvrté stádium popouštění (nad 500 °C). S tímto stádiem popouštění je spojováno postupné hrubnutí částic cementitu, rekrytalizace a hrubnutí feritického zrna. Zvyšuje se houževnatost a plasticita oceli, naproti tomu pevnost dále klesá. Získaná struktura za nižších popouštěcích teplot v tomto rozmezí je sorbit, za největších teplot (pod A_{c1}) zrnitý perlit [13, 14].

Popouštění při nízkých teplotách

Provádí se zpravidla v rozsahu teplot 100–300 °C. Cílem popouštění při nízkých teplotách je částečné odstranění vnitřních pnutí, zmenšení obsahu zbytkového austenitu a stabilizování rozměrů součásti při zachování vysoké tvrdosti. Předměty jsou popouštěny v solných lázních, vařící vodě, v teplých olejových lázních nebo v elektrických pecích [12].

Popouštění při vysokých teplotách

Obvykle se provádí v rozmezí 400–650 °C. Využívá se pro dosažení optimální kombinace pevnostních vlastností, a to houževnatosti a plasticity. Tuto kombinaci garantuje sorbitická struktura, která vzniká ve 3. respektive 4. stádiu popouštění. Pokles pevnostních charakteristik není v určitých oblastech popouštěcích teplot doprovázen odpovídajícím zvýšením hodnot houževnatosti. Tento pokles houževnatosti je pojmenován jako popouštěcí křehkost [12].

3 SOUSTRUŽENÍ ZAKALENÝCH SOUČÁSTÍ

Obecnou definicí obrábění zakalených součástí je obrábění s tvrdostí nad 45 HRC, i když se tento proces nejčastěji týká tvrdostí 58 až 68 HRC. Obrábění zakalených součástí představuje několik výhod ve srovnání s tradiční metodikou založenou na operaci dokončovacího broušení po tepelném zpracování obrobků. Také tato technologie představuje velký příspěvek k udržitelné výrobě [15].

3.1 Teorie soustružení

Specifické pro obráběcí metodu soustružení je zhotovení součástí rotačních tvarů za použití jednobřítých nástrojů. Soustružení patří k nejjednodušším způsobům obrábění a také k nejvíce využívané metodou ve strojírenství [16].

Kinematika soustružení

Hlavní řezný pohyb u soustružení je rotační a vykonává jej obrobek. Rychlost hlavního pohybu je zároveň řeznou rychlostí, která je definována vztahem [17]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m/min] \quad (3.1)$$

kde: v_c – řezná rychlost $[m/min]$,

D – průměr obrobku $[mm]$,

n – otáčky $[min^{-1}]$.

Vedlejší řezný pohyb je posuvný a je vykonáván nástrojem. Posuvová rychlost je definována vztahem [17]:

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} [m/min] \quad (3.2)$$

kde: v_f – posuvová rychlost $[m/min]$,

f – posuv na otáčku obrobku $[mm]$,

n – otáčky $[min^{-1}]$.

Efektivní výsledný pohyb je vektorovým součtem rezného a posuvového pohybu, který je ve skalárním tvaru definován [17]:

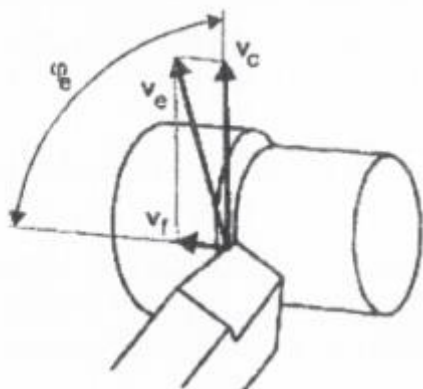
$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} [m/min] \quad (3.3)$$

kde: v_e – efektivní výsledný pohyb $[m/min]$,

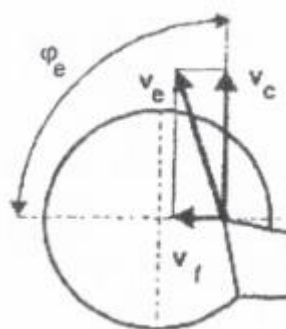
v_c – řezná rychlost $[m/min]$,

v_f – posuvová rychlost $[m/min]$.

Kinematická souvislost při válcovém soustružení je znázorněna na obr. 3.1. Kinematický souvislost čelního soustružení je znázorněna na obr. 3.2 [17].



Obr. 3.1 Podélné soustružení válcové plochy [17].



Obr. 3.2 Příčné soustružení čelní plochy [17].

Průřez třísky

Průřez třísky se definuje jako odřezávaná vrstva z objemu materiálu, která je odebírána ostrím nástroje [17].

Jmenovitý průřez třísky se určí vztahem [18]:

$$A_D = a_p \cdot f = b_D \cdot h_D \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.4)$$

kde: A_D – jmenovitý průřez třísky [mm²],

a_p – šířka záběru ostří [mm],

f – posuv na otáčku [mm],

b_D – jmenovitá šířka třísky [mm],

h_D – jmenovitá tloušťka třísky [mm].

Pro podélné soustružení vyjádříme šířku záběru ostří ze vztahu [18]:

$$a_p = 0,5 \cdot (D - d) \text{ [mm]} \quad (3.5)$$

kde: a_p – šířka záběru ostří [mm],

D – průměr obráběné plochy [mm],

d – průměr obrobené plochy [mm].

Pro čelní soustružení vyjádříme šířku záběru ostří ze vztahu [18]:

$$a_p = L - l \text{ [mm]} \quad (3.6)$$

kde: a_p – šířka záběru ostří [mm],

L – délka obráběné plochy [mm],

l – délka obrobené plochy [mm].

Jmenovitá šířka třísky se vyjádří ze vztahu [18]:

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \text{ [mm]} \quad (3.7)$$

kde: b_D – jmenovitá šířka třísky [mm],

a_p – šířka záběru ostří [mm],

κ_r – nástrojový úhel nastavení hlavního ostří [°].

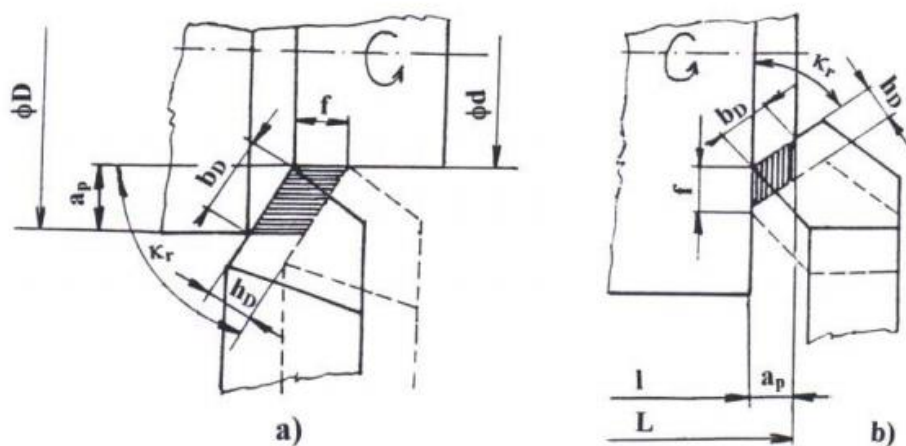
Jmenovitá tloušťka třísky (obr. 3.3) se vyjádří ze vztahu [18]:

$$h_D = f \cdot \sin \kappa_r \text{ [mm]} \quad (3.8)$$

kde: h_D – jmenovitá tloušťka třísky [mm],

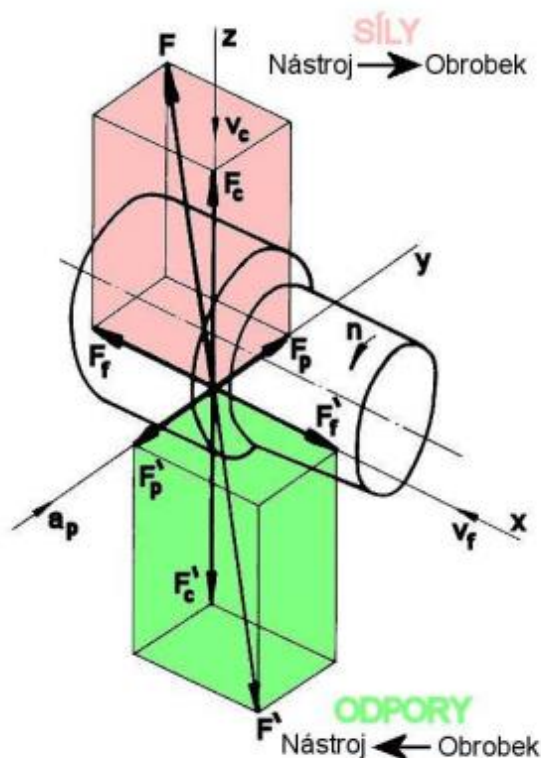
f – posuv na otáčku [mm],

κ_r – nástrojový úhel nastavení hlavního ostří [°].



Obr 3.3 Identifikace průřezu třísky při soustružení a) válcová plocha b) čelní plocha [18].

Silové působení při soustružení



Obr. 3.4 Složky řezných sil a odpory při podélném soustružení [16].

Řezná síla F_c , posuvová síla F_f a pasivní síla F_p znázorněné na obr. 3.4. se definují pro podélné soustružení válcové plochy ze vztahů [18]:

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} [N] \quad (3.9)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} [N] \quad (3.10)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} [N] \quad (3.11)$$

kde: $C_{F_c}, C_{F_f}, C_{F_p}$ – materiálové konstanty [–],

$x_{F_c}, x_{F_f}, x_{F_p}$ – exponenty vlivu a_p [–],

$y_{F_c}, y_{F_f}, y_{F_p}$ – exponenty vlivu f [–],

a_p – šířka záběru ostří [mm],

f – posuv na otáčku [mm].

Celkovou řeznou sílu F poté vypočítáme z těchto složek pomocí vztahu [18]:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} [N] \quad (3.12)$$

Hodnota měrné řezné síly je určena řeznou silou, vztaženou na jednotku plochy řezu. Tato hodnota je definována jako poměr řezné síly F_c a jmenovitého průřezu třísky A_D [18]:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} [MPa] \quad (3.13)$$

Stanovení celkového výkonu obráběcího stroje pro potřebné pokrytí řezného výkonu a pasivních odporů je z výpočtu [18]:

$$P_m = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^3 \cdot \eta} [kW] \quad (3.14)$$

kde: P_m – celkový výkon obráběcího stroje [kW],

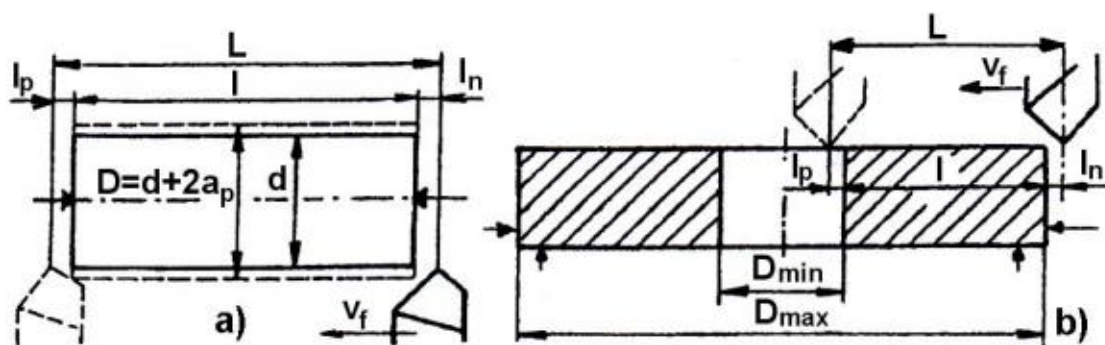
F_c – řezná síla [N],

v_c – řezná rychlost [m/min],

η – mechanická účinnost obráběcího stroje [–].

Jednotkový strojní čas

Pro stanovení jednotkového strojního času obráběcích procesů je potřeba vyjít z poměrů znázorněných na Obr. 3.5 [18].



Obr. 3.5 Jednotkový strojní čas a) podélné soustružení b) čelní soustružení [18].

Výpočet pro podélné soustružení válcové plochy [18]:

$$t_{AS} = \frac{L}{n \cdot f} [min] \quad (3.15)$$

kde: t_{AS} – jednotkový strojní čas [min],

L – dráha nástroje [mm],

n – otáčky [min^{-1}],

f – posuv na otáčku [mm].

Dráha nástroje ve směru posuvu L je dána součtem jednotlivých složek [16]:

$$L = l + l_n + l_p \text{ [mm]} \quad (3.16)$$

kde: l – délka soustružené plochy [mm],

l_n – délka náběhu [mm],

l_p – délka přeběhu [mm].

Výpočet pro soustružení čelních ploch obr. 1.5 b se rozlišuje na jednotkový strojní čas obrábění při konstantních otáčkách obrobku t_{ASn} a obrábění konstantní řeznou rychlostí t_{ASv} .

Hodnota t_{ASn} se určí pro definovanou dráhu L ze vztahu (3.15).

Velikost t_{ASv} se určí podle závislosti [16]:

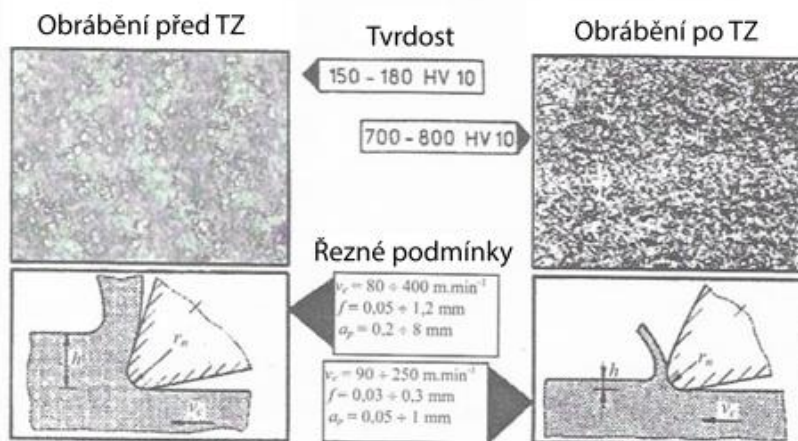
$$t_{ASv} = \frac{\pi \cdot [(D_{max} + 2l_n)^2 - (D_{min} - 2l_p)^2]}{4 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \text{ [min]} \quad (3.17)$$

kde: v_c – řezná rychlost [m/min],

f – posuv na otáčky [mm].

3.2 Teorie soustružení zakalených součástí



Cílem tohoto způsobu obrábění je nahradit dokončovací broušení kalených součástí soustružením geometricky definovaným řezným nástrojem. Dosažení obrobení těchto tvrdých materiálu umožňuje použití řezných materiálů na bázi KNB – kubického nitridu boru, který je druhým nejtvrdším řezným materiálem a zároveň má nejvyšší odolnost vůči tepelným a mechanickým rázům. Intenzita opotřebení při obrábění kalených ocelí je poměrně vysoká což vede k poměrně intenzivnímu nárůstu silového působení. Rozložení silového působení do jednotlivých složek řezné síly úzce souvisí s geometrií nástroje hlavně s úhlem čela. Hlavní oblast soustružení kalených ocelí se pohybuje pro obrábění kaleného materiálu v rozmezí tvrdosti 58–68 HRC. Typická řezná rychlost pro toto obrábění se pohybuje v rozmezí 100–175 m/min. Řezný proces soustružení před tepelným zpracováním se odlišuje v porovnání se soustružením po tepelném zpracování, viz obr. 3.6 [15, 19, 22].



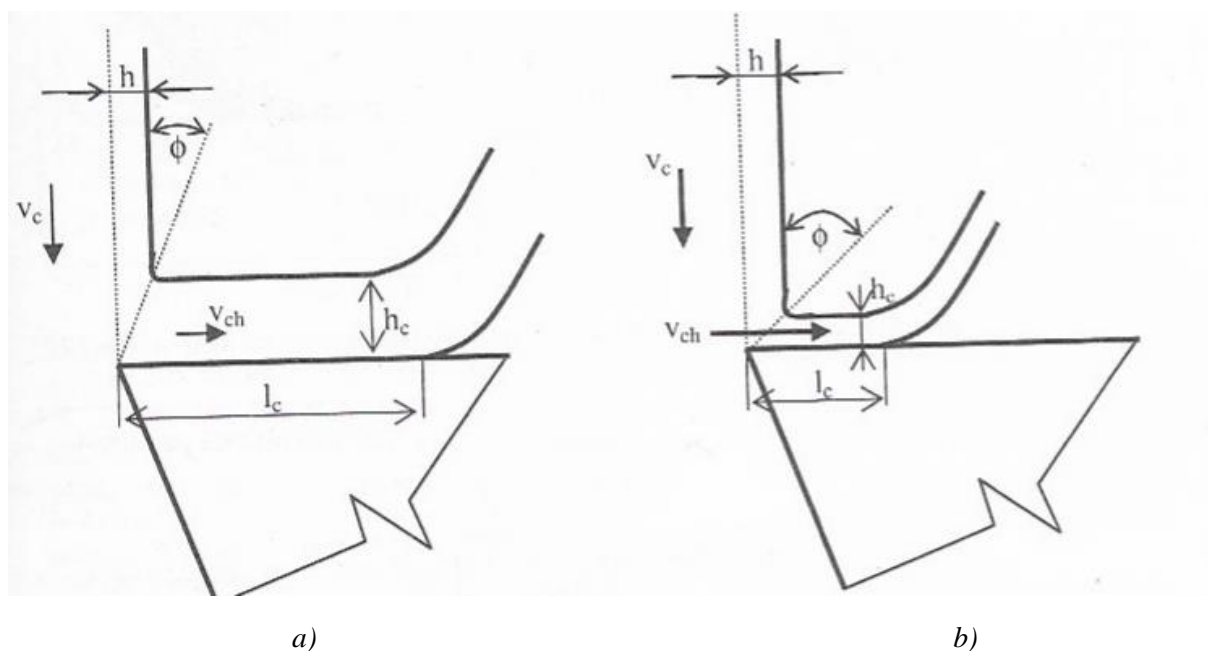
Obr. 3.6 Některé rozdíly mezi soustružením před a po tepelném zpracování, podle [19].

Porovnání schopností procesu tvrdého obrábění a broušení z ekonomického pohledu, flexibility, ekologie a kvality je zobrazeno podle Tönshoffa v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Porovnání vybraných aspektů broušení a soustružení kalených materiálů [20].

	Soustružení kalených materiálů 	Broušení 	Legenda + pozitivně hodnocené - negativně hodnocené o neutrálně hodnocené ? vyhodnocení není možné * v závislosti na použití může být poměr 1:10 až 10:1 ** speciální účely nebo brousící centra jsou často potřebné
Ekonomické aspekty	+/- *	+/- *	výrobní čas
	+	-	míra odstraňování materiálu
	o/+ **	o/- **	vstupní náklady
	-	+	náklady na nástroje
Flexibilita	+	-	abrazivní opracování
	+	-/o	tvarové obrábění
Ekologické aspekty	+	-	požadavky na výkon
	+	-	chlazení
	+	-	recyklace třísky
Kvalita	?	+	kvalita obrobku
	?	+	spolehlivost procesu
	?	+	integrita povrchu

Základním rozdílem je aplikace menších posuvů a hloubek řezu při soustružení kalených součástí než u soustružení před tepelným zpracováním. Některé zásadní rozdíly v procesech obrábění se nachází v oblasti řezu (obr. 3.7). Tyto rozdíly vyplývají z rozdílných vlastností obráběného materiálu. Při soustružení kalených součástí je proces plastické deformace v oblasti řezu zásadně odlišný od procesu charakteristického pro obrábění materiálu před kalením. Při obrábění kalených ocelí se tvoří charakteristická segmentová tříska, oproti tomu se při soustružení ocelí před tepelným zpracováním vytváří klasická plynulá tříska. Na začátku je skutečnost že úhel ϕ nabývá při tvrdém obrábění mnohem větší hodnoty. Stejně jak rychlost odcházející třísky v_{ch} mnohem větší při obrábění zakalených součástí. Při tvrdém obrábění se ale zkracuje délka kontaktu mezi čelem nástroje a třískou l_c a tloušťka třísky h_c je také v porovnání s obráběním před tepelným zpracováním výrazně menší. V souvislosti s tím je i celková intenzita plastické deformace při soustružení kalených materiálů menší a lokalizuje se pouze do úzkých oblastí. Takový charakterový proces v oblasti řezu zásadně ovlivňuje všechny doprovodné jevy řezného procesu. Například teplota v oblasti řezu, silové působení, stabilita řezného procesu, opotřebení nástrojů, integrita povrchu a podobně. Komplexní hodnocení řezného procesu v širším pohledu ukazuje, že tvrdé obrábění má spoustu společných znaků s vysokorychlostním obráběním. Z toho plyne že rozdíl v charakterním procesu oblasti řezu nejsou jen funkcí vlastního obráběného materiálu, ale souvisí i s dalšími faktory jako jsou řezné podmínky, geometrie nástroje, druh operace a podobně [19].



Obr. 3.7 Rozdíly v oblasti plastické deformace a) obrábění před tepelným zpracováním b) obrábění po tepelném zpracování [19].

3.3 Vhodná volba obráběcího stroje

Pro soustružení kalených materiálů jsou využívány klasické konvenční soustruhy. Využití těchto obráběcích strojů dovoluje dosažení přesností IT 6–7 při tvrdém obrábění za dodržení patřičných podmínek. Pro dosažení součástek s vyšší přesností je nutné provádět obrábění na strojích s vysokou tuhostí. Základní faktor je negativní geometrie ostří. V závislosti na tom je pasivní složka řezné síly mnohem vyšší než tangenciální. Právě tato pasivní složka řezné síly výrazně ovlivňuje deformace v technologické soustavě. Tyto deformace se následně dostávají do přesnosti obrobku. Výrazně vyšší kvalitu obrábění lze dosáhnout pomocí obráběcích strojů, které se nazývají velmi přesné soustruhy. Dosahovaná přesnost těchto strojů je porovnatelná s brousicími stroji. U těchto strojů je dosahovaná přesnost v rozsahu IT 4–6. Tyto velmi přesné soustruhy jsou charakteristické hydrostatickým uložením vřetena a suportu. Teplo produkované obráběcím strojem, elektrickým a hydraulickým zařízením se eliminuje umístěním těchto zařízení mimo stroj a tím dochází ke zvýšení tepelné stability stroje [19, 20].

Příkladem jednoho takového vhodného stroje je kompaktní stroj Mikrotorn 500 XL (obr. 3.8). Tento stroj je schopen dosahovat skvělé přesnosti při soustružení kalených ocelí, díky vynikající statické a dynamické tuhosti a tepelné stabilitě stroje. Skvělá přesnost dosažená díky základně, která je z přírodní žuly s integrovaným systémem tlumení vibrací. Přírodní žula je dokonalým základem stroje, má velmi dobré tlumicí vlastnosti, je korozi-vzdorná a má nízký koeficient tepelné roztažnosti [21].



Obr. 3.8 Stroj Mikroturn XL 500 [21].

Vlastnosti velmi přesných soustruhů [20]:

- přesnost srovnatelná s brousíci stroji,
- vysoká tepelná, statická a dynamická tuhost,
- hydrostatické ložiska vřetene a kluzných vedení,
- nízké energetické nároky,
- rozměrová a tvarová přesnost IT 4–6.

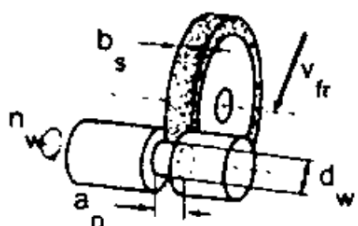
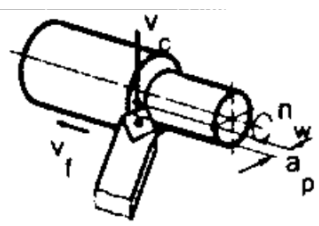
Technologické parametry velmi přesných soustruhů [20]:

řezná rychlost:	$v_c = 100\text{--}250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,	přesnost vřetena:	$0,1 \mu\text{m}$,
posuv:	$f = 0,03\text{--}0,14 \text{ mm}$,	axiální tuhost:	$1140 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,
hloubka řezu:	$a_p = 0,02\text{--}1 \text{ mm}$,	radiální tuhost:	$1020 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,
síla:	$F = 10\text{--}200 \text{ N}$.		
kluzné vedení		NC–řízení	
tuhost:	$720 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,	systémové rozlišení:	$0,05 \mu\text{m}$.
nejmenší pohybový	$0,05 \mu\text{m}$.		
krok:			

3.4 Ekonomický aspekt obrábění zakalených součástí

Pro ekonomické hledisko je rychlost odebrání materiálu důležitým aspektem ovlivňujícím posouzení produktivity řezného procesu. Pro porovnání s broušením je rychlost úběru materiálu Q_w přinejmenším stejně vysoká jako pro soustružení zakalených materiálů. Dalším důležitým kritériem ovlivňující produktivitu je rychlost vytvoření nového povrchu A_w . Tabulka 3.2 ukazuje vztahy mezi podmínkami obrábění a rychlostí úběru materiálu. Z výpočtů je patrné, že při broušení je rychlost dosahovaného finálního povrchu vyšší jak při soustružení kalených součástí. Toto dokazuje, že čas obrábění soustružením je delší než čas pro broušení. Rychlost úběru materiálu v porovnání s rychlostí tvoření povrchu získává částečnou důležitost v případě obrábění menších průměrů s nižšími přísuvy a menší hloubkou řezu. Produktivita technologie soustružení je způsobena vysokou časovou flexibilitou. Různé tvary a povrchy mohou být obrobena jedním nástrojem. Kromě toho je ve většině případů zapotřebí pouze jeden nástroj pro vnější obrábění a jeden pro vnitřní. Díky těmto výhodám se může čas pro soustružení výrazně zkrátit. Finální řešení časů opracování a výrobních nákladů může být hodnocené jen na základě specifikace produkčních úloh. Aplikace soustružení kalených materiálů představuje obrovský potenciál v náhradě brusných operacích. Dodatečnou výhodou soustružení kalených součástí je vyhnutí se řezným kapalinám. Možnost obrábění na sucho znamená ušetření nákladů na nákup, skladování, filtrování, recyklování a likvidování řezných kapalin [19, 20].

Tab. 3.2 Porovnání vybraných aspektů broušení a soustružení [20].

Technologie	Broušení	Soustružení
		
Rychlost úběru materiálu	$Q_w = a_p \cdot Q_w'$ (3.18)	$Q_w = a_p \cdot f \cdot v_c$ (3.19)
Specifická rychlost úběru materiálu	$Q_w' = \pi \cdot d_w \cdot v_{fr}$ (3.20)	$Q_w' = \frac{(a_p \cdot f \cdot v_c)}{l}$ (3.21)
Rychlost vytváření povrchu	$A_w = a_p \cdot v_{fr}$ (3.22)	$A_w = f \cdot v_c$ (3.23)
Charakteristické parametry	$a_p = 5\text{--}20 \text{ mm}$	$a_p = 5\text{--}0,3 \text{ mm}$ $f = 0,05\text{--}0,2 \text{ mm}$ $v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Obvyklé hodnoty dosažených parametrů	$Q_w = 2\text{--}12 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ $Q_w' = 10\text{--}240 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ $A_w = 5000\text{--}20000 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_w = 22\text{--}242 \text{ mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ $Q_w' = 6\text{--}150 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ $A_w = 125\text{--}500 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

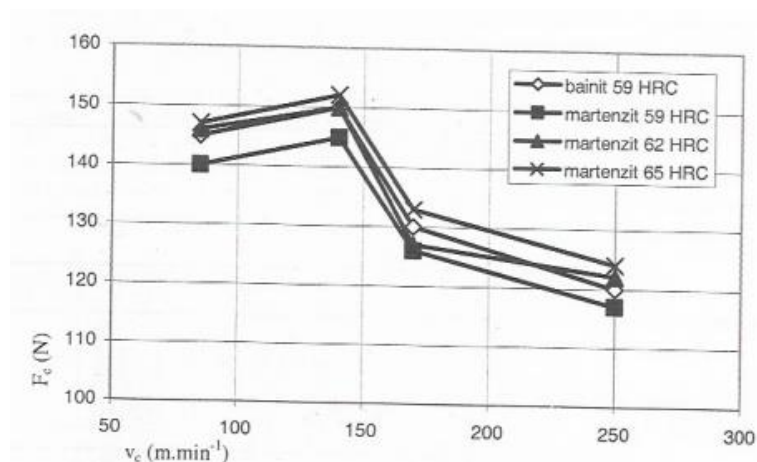
3.5 Složky řezných sil při soustružení zakalených součástí

U tohoto typu soustružení složky řezné síly a rozložené napětí v oblasti řezu jsou výrazně ovlivněné tvrdostí obrobku. Změna složek řezné síly je úzce spjatá s geometrií nástroje, především s úhlem čela. Při obrábění měkkých ocelí velikost složek řezné síly s rostoucí tvrdostí klesá. Když tvrdost překročí hranici 50 HRC vzniká segmentová tříska, řezná síla a tvrdost materiálu začíná růst. Je to dáno dvěma aspekty. Prvním je zvyšování meze skluzu v souvislosti se zvyšováním tvrdosti a druhým je snižování meze kluzu v souvislosti s vysokou teplotou v oblasti řezu. Když tvrdost oceli překročí určitou hranici, ocel obráběná při velkých průřezích třísky se chová jako křehký materiál a deformační energie je proto malá. Toto je příčina redukce vygenerovaného tepla v oblasti řezu tedy pokles tvrdosti a pevnosti materiálu nenastane. Snížením teploty na čele nástroje vede ke zvýšení střížné síly při vzniku segmentové třísky. Vysoká třecí síla následně způsobuje vysokou řeznou sílu a výrazný stav napjatosti v trísce. Pro snížení mechanického a tepelného zatížení na přijatelnou hodnotu je nezbytné při obrábění kalených materiálů volit malé hloubky řezu a posuvy. Při soustružení kalených ocelí vzniká tříska především v oblasti fazetky s negativním úhlem čela. Radiální složka řezné síly F_p je největší složkou ze všech. Tato složka s postupujícím opotřebením nástroje roste. Negativní úhel čela způsobuje nárůst této složky F_p , je to především vznikem segmentové třísky, protože při obrábění měkkých ocelí nástrojem s negativní geometrií složky F_c a F_p rostou přibližně stejně. Na základě měření vlivu řezných podmínek je možné stanovit strukturální rovnice 3.24 až 3.31 pro složky řezné síly a pro výslednou řeznou rychlost. V tab. 3.3 je příklad strukturálních rovnic pro dva vybrané materiály [19, 22].

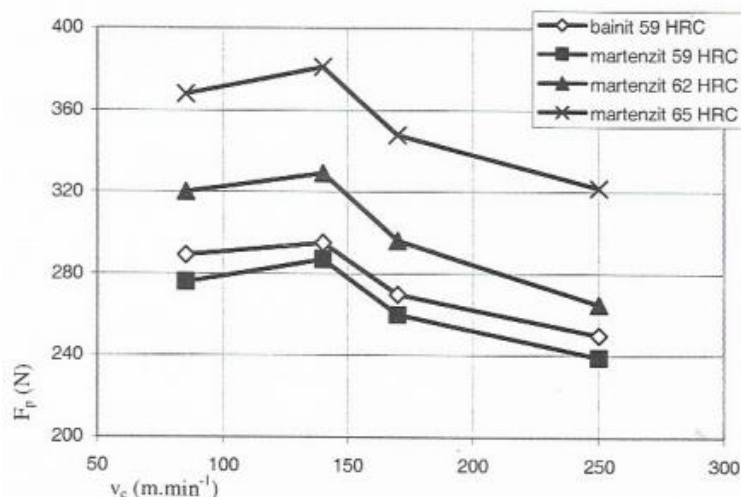
Tab. 3.3 Strukturální rovnice získané z analýzy silových složek F_c , F_p , F_f , řezné síly F , při soustružení dvou vzorků ložiskové ocele 100Cr6 s odlišnou mikrostrukturou získanou po kalení [19].

Obráběný materiál	Strukturální rovnice		
Martenzitický vzorek (62 HRC)	$F_c = 3916 \cdot a_p^{0,85} \cdot f^{0,69} \cdot v_c^{-0,11}$	[N]	(3.24)
	$F_p = 2834 \cdot a_p^{0,43} \cdot f^{0,39} \cdot v_c^{-0,08}$	[N]	(3.25)
	$F_f = 1559 \cdot a_p^{1,09} \cdot f^{0,21} \cdot v_c^{-0,09}$	[N]	(3.26)
	$F = 3892 \cdot a_p^{0,54} \cdot f^{0,41} \cdot v_c^{-0,09}$	[N]	(3.27)
Bainitický vzorek (59 HRC)	$F_c = 2259 \cdot a_p^{0,84} \cdot f^{0,69} \cdot v_c^{-0,02}$	[N]	(3.28)
	$F_p = 1467 \cdot a_p^{0,47} \cdot f^{0,51} \cdot v_c^{0,05}$	[N]	(3.29)
	$F_f = 878 \cdot a_p^{1,16} \cdot f^{0,39} \cdot v_c^{0,07}$	[N]	(3.30)
	$F = 2166 \cdot a_p^{0,60} \cdot f^{0,52} \cdot v_c^{0,04}$	[N]	(3.31)
pro $\forall v_c \in \langle 90 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}; 250 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} \rangle$, $\forall a_p \in \langle 0,1 \text{ mm}; 1 \text{ mm} \rangle$, $\forall f \in \langle 0,05 \text{ mm}; 0,721 \text{ mm} \rangle$			

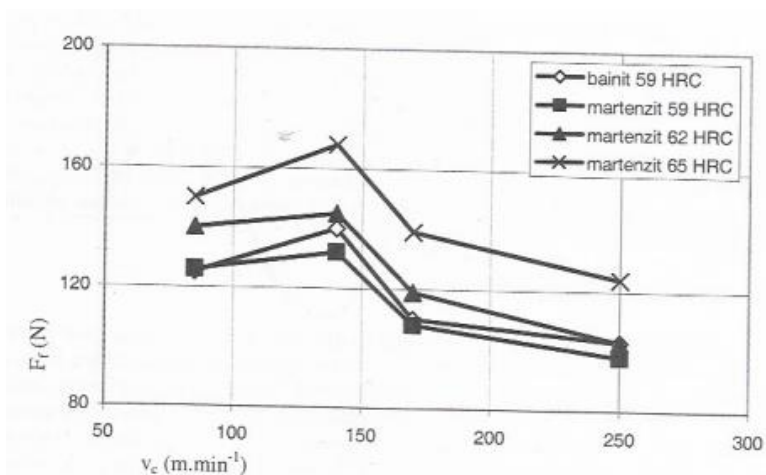
Pro lepší pohled na srovnání těchto řezných složek je dosazeno do strukturálních rovnic. Tímto dosazením je znázorněna tangenciální složky řezné síly F_c na obr. 3.9, radiální složky řezné síly F_p na obr. 3.10 a axiální složky řezné síly F_f na obr. 3.11.



Obr. 3.9 Závislost tangenciální složky řezné síly F_c na řezné rychlosti v_c , $a_p = 0,25$ mm, $f = 0,09$ mm, $Al_2O_3 + TiC$ (DNGA 150408), $\gamma_0 = -10^\circ$, $\alpha_0 = 10^\circ$ [19].



Obr. 3.10 Závislost radiální složky řezné síly F_p na řezné rychlosti v_c , $a_p = 0,25$ mm, $f = 0,09$ mm, $Al_2O_3 + TiC$ (DNGA 150408), $\gamma_0 = -10^\circ$, $\alpha_0 = 10^\circ$ [19].



Obr. 3.11 Závislost axiální složky řezné síly F_f na řezné rychlosti v_c , $a_p = 0,25$ mm, $f = 0,09$ mm, $Al_2O_3 + TiC$ (DNGA 150408), $\gamma_0 = -10^\circ$, $\alpha_0 = 10^\circ$ [19].

3.6 Textura obrobené plochy

Drsnost obrobené plochy je způsobena stopami, které jsou vytvářeny ostřím nástroje. Druh a stupeň drsnosti je ovlivněn metodou obrábění, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu, tvarem a geometrií břitu řezného nástroje, řeznými podmínkami, opotřebením nástroje, způsobem upínání obrobku, řeznou kapalinou a v neposlední řadě tuhostí celé soustavy stroj – nástroj – obrobek. Definovanou drsnost povrchu na výkrese součásti je možné považovat za limitní hodnotu, která se má v technologickém procesu dosáhnout. Jednoduchý geometrický přístup k identifikaci mikrogeometrie obrobeného povrchu vychází z prostého kopírování tvaru ostří nástroje na obrobený povrch [23, 24].

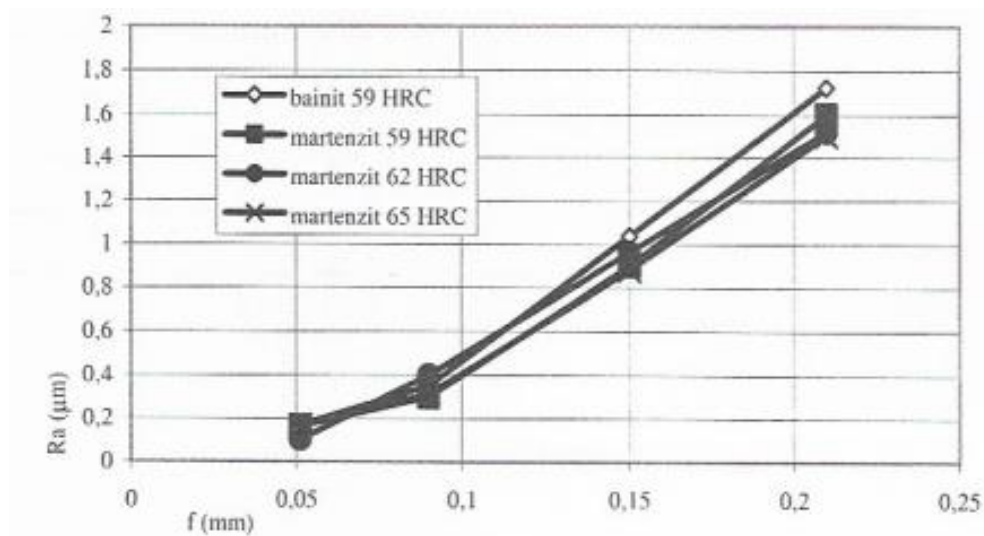
Z analýzy vlivů řezných podmínek je vidět, že na velikost R_a a další parametry drsnosti povrchu má největší vliv posuv (obr. 3.12). Znázorněno na obr. 3.13 a obr. 3.14. Stejně tak ukazují i strukturální rovnice 3.32 až 3.35 v tab. 3.4. Tím je dokázáno že s rostoucí řeznou rychlostí dochází ke zlepšení drsnosti povrchu [19].

HRC 55	POVRCH		POVRCH
f (mm)	$v_c = 90 \text{ m.min}^{-1}$	f (mm)	$v_c = 120 \text{ m.min}^{-1}$
0,047		0,047	
0,09		0,1	
0,15		0,15	
0,2		0,2	
0,27		MIERKA	

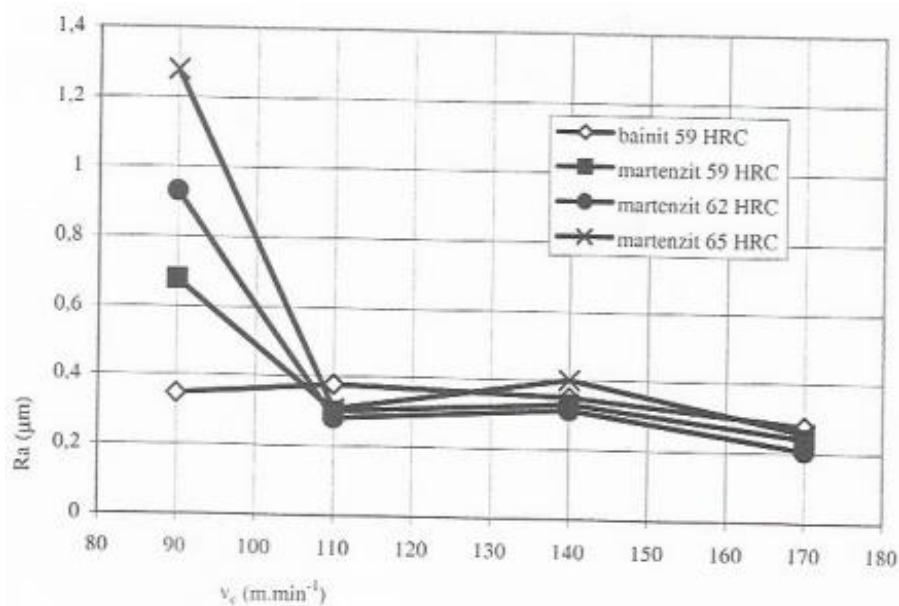
Obr. 3.12 Vliv posuvu na charakter obrobeného povrchu, 12 050 55HRC (C604 ekvivalent podle ISO), keramika SNGN 120408, $\gamma_0 = -6^\circ$, $\alpha_0 = 11^\circ$, $r_\epsilon = 0,8 \text{ mm}$ [19].

Tab. 3.4 Strukturální rovnice získané z analýzy střední aritmetické odchylky profilu, při soustružení čtyř vzorků ložiskové ocele 14 109 s odlišnou mikrostrukturou [19].

Obráběný materiál	Strukturální rovnice		
Martenzit 62 HRC	$Ra = 70495 \cdot a_p^{0,004} \cdot f^{1,58} \cdot v_c^{-1,71}$	$[\mu m]$	(3.32)
Martenzit 65 HRC	$Ra = 376233 \cdot a_p^{0,28} \cdot f^{1,90} \cdot v_c^{-1,80}$	$[\mu m]$	(3.33)
Martenzit 59 HRC	$Ra = 115035 \cdot a_p^{-0,004} \cdot f^{1,98} \cdot v_c^{-1,11}$	$[\mu m]$	(3.34)
Bainit 59 HRC	$Ra = 63 \cdot a_p^{-0,008} \cdot f^{1,68} \cdot v_c^{-0,23}$	$[\mu m]$	(3.35)
pro $\forall v_c \in \langle 90 \text{ m.min}^{-1}; 250 \text{ m.min}^{-1} \rangle$, $\forall a_p \in \langle 0,1 \text{ mm}; 1 \text{ mm} \rangle$, $\forall f \in \langle 0,05 \text{ mm}; 0,721 \text{ mm} \rangle$			



Obr. 3.13 Porovnání Ra v závislosti od měnícího se posuvu, $v_c = 140 \text{ m.min}^{-1}$, $a_p = 0,25 \text{ mm}$, $Al_2O_3 + TiC$ (DNGA 150408) $\gamma_0 = -10^\circ$, $\alpha_0 = 10^\circ$, $r_\epsilon = 0,8 \text{ mm}$, 100Cr6 [19].



Obr. 3.14 Porovnání Ra v závislosti od měnící se řezné rychlosti, $f = 0,09 \text{ mm}$, $a_p = 0,25 \text{ mm}$, $Al_2O_3 + TiC$ (DNGA 150408) $\gamma_0 = -10^\circ$, $\alpha_0 = 10^\circ$, $r_\epsilon = 0,8 \text{ mm}$, 100Cr6 [19].

4 OKRUŽOVACÍ FRÉZOVÁNÍ ZÁVITŮ KULIČKOVÝCH ŠROUBŮ

Okružovací frézování závitů je obdobným procesem frézování závitů. Hlavním rozdílem je uložení břitových destiček, které jsou umístěny na vnitřní straně závitořezného prstence nikoliv na vnější, jako tomu je u klasických frézovacích nástrojů. Okružovací frézování je produktivní metoda často využívána pro výrobu speciálních profilů závitu s vysokou přesností [25].

4.1 Kuličkové šrouby

Vzájemný pohyb nástroje vůči obrobku je získán složením z jednoduchých translačních a rotačních pohybů uspořádaných v závislosti na způsobu technologie. Sjednocením těchto pohybů s pohybovými osami obráběcího stroje je dosažena jeho kinematická struktura. Přímočarý pohyb obráběcího stroje může být hlavní řezný pohyb, posuv nebo přísuv a je možné ho vyvodit různými mechanismy. Nejvíce je využíván kuličkový šroub a matice sloužící k převodu rotačního pohybu od hnacího agregátu na pohyb translační a díky jeho vlastnostem je to umožněno i opačně [26].

Příklad jednoho takového kuličkového šroubu s maticí je zobrazen na obr. 4.1. Jedná se o kuličkový šroub precise screw, od firmy KSK Kuřim [27].



Obr. 4.1 Kuličkový šroub precise screw [27]

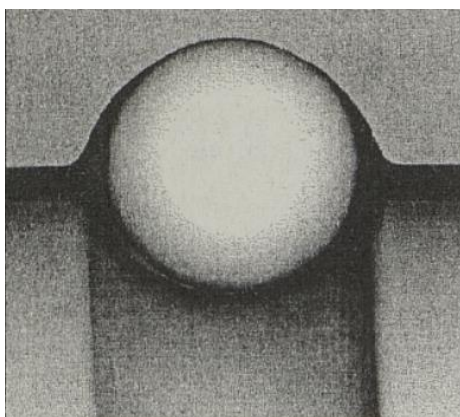
Princip kuličkového šroubu a matice

Do závitu vhodného profilu jsou vloženy kuličky, které při rotačním pohybu šroubu nebo matice jsou vedeny závitem a odvalují se podobně jako v kuličkových ložiscích. Kuličky cirkulují v uzavřeném obvodu otáčením šroubu nebo matice. Délka tohoto obvodu je omezena počtem závitů v matici. Pro zlepšení účinnosti, umožnění vymezení vůle a zmenšení opotřebení závitů, zavádějí se šrouby a matice se třením valivým, jejichž účinnost bývá 90 % a více. Povrchy závitů jsou kalené. Závity jsou vyráběny s vysokou přesností, dovolená úchylka stoupání bývá např. 0,023 mm na 300 mm [26, 28, 29].

Mezi hlavní přednosti kuličkových šroubů a matic je řazena vysoká účinnost, minimální oteplování během provozu, možnost úplného odstranění vůle a možnost vytvoření předpětí to znamená vysokou tuhost a přesnost. Dalšími přednostmi je malé opotřebení a tím zapříčiněná dlouhá životnost, potlačení vzniku trhavých pohybů nebo již zmíněná možnost převodu přímočarého pohybu na rotační [28, 29].

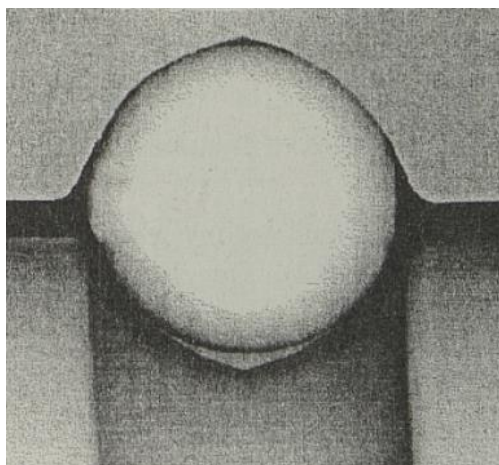
Rozdělení kuličkových šroubů podle profilu závitu

Jsou používány dvě provedení profilu závitu. Prvním je kruhový profil (obr. 4.2), který je používán pro méně náročné aplikace z důvodu toho že stykový úhel kuličky a profilu závitu je malý. Tímto je způsobena značná síla ve styku kuličky a závitu. Toto provedení je výrobně jednodušší ale má horší účinnost. Někteří výrobci v zahraničí často využívají tento typ provedení v nekaleném stavu. Šroub je vyroben způsobem tváření, válcováním profilu, to má za následek menší přesnost, ale za to je velmi levný [26, 28].



Obr. 4.2 Kruhový profil závitu [26].

Druhým je profil gotický (obr. 4.3). Toto provedení je používáno nejčastěji. Tento profil je tvořen dvěma oblouky s poměrem voleným tak, aby úhel styku kuliček se závitovou plochou byl 45 až 50°. Provedení s gotickým profilem využívá například firma KSK Kuřim. Využívá jej pro jeho výhody, ke kterým se řadí vysoká přesnost, možnost předepnutí a možnost vymezení vůle. Právě vymezení vůlí v matici slouží ke zvýšení přesnosti polohování. Kdyby nedošlo ke zbavení vůle u pohonu obráběcího stroje, docházelo by při změně orientace zatěžující síly k výrobním nepřesnostem a rázům [26, 28, 29].



Obr. 4.3 Gotický profil závitu [26].

Uložení kuličkových šroubů

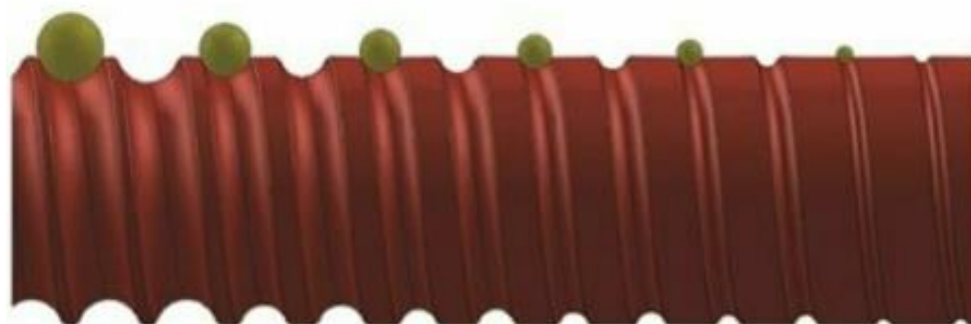
Důležitým parametrem pohybového mechanismu realizovaného pomocí kuličkového šroubu a matice je jeho statická tuhost, která je ovlivněna nejen konstrukcí šroubu ale i způsobem axiálního uložení. U jednostranného axiálního uložení nastává při průběhu zdvihu ke snížení tuhosti. U oboustranného axiálního uložení a předepnutí je finální průběh statické tuhosti o poznání příznivější. U tohoto provedení je potřeba brát v úvahu vliv dilatací a oteplování pohybového šroubu během provozu, které by mohly zapříčinit zadření. Při uložení ve dvou axiálních ložiskách je tuhost výrazně vyšší a ve střední zdvihové části zůstává přibližně konstantní. V případě tohoto uložení je zapotřebí uvážit, že vlivem valivého tření mezi šroubem a maticí dochází k oteplení šroubu, což je důsledkem teplotní dilatace. V tomto případě teplotní dilatace způsobují další nežádoucí síly. Proti působení těchto sil se šrouby předepnou na tah, během ohřevu se předpětí anulují a přechází v tlakové. [28, 29].

Všeobecně lze pro uložení pohybového šroubu stanovit některé konstrukční zásady [28]:

- přednostně volit ložiska s přímkovým stykem jehlová, válečková,
- minimalizovat počet opěrných vložených kroužků, protože každá styková plocha snižuje tuhost,
- připojovací a dosedací plochy mají být opracovány s vysokou jakostí povrchu,
- všechny prvky uložení mají mít maximální tuhost,
- jednotlivá ložiska je vhodné předepnout.

Hřídel kuličkového šroubu

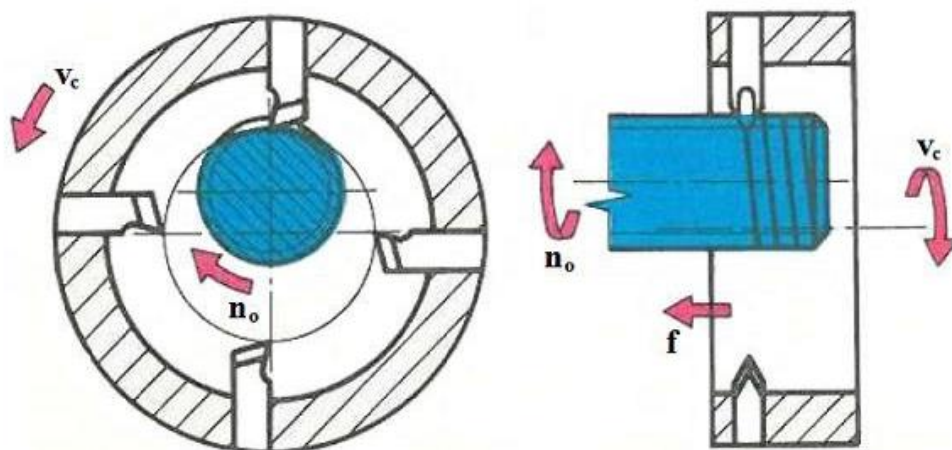
Hřídel kuličkového šroubu je složena ze závitové části, levotočivého nebo pravotočivého stoupání závitu a jeden nebo více chodů. Dále je složena z ložiskového čepu pro uložení uvnitř valivých ložisek, a to oboustranně nebo jednostranně. Stoupání závitu je zapotřebí při konstrukci hřídele zkoumat v relaci s průměrem šroubu a průměrem kuličky. Těmito třemi veličinami (obr. 4.4) je určena šířka hřbetu mezi sousedními závity, což má velký vliv na opracování šroubu a jeho mechanické vlastnosti [30].



Obr. 4.4 Průměr kuličky, stoupání a průměr šroubu hraje velkou roli při konstrukci hřídele kuličkového šroubu [30].

4.2 Teorie okružovacího frézování

Okružovací frézování (obr. 4.5) je používáno při obrábění dlouhých válcových tyčí a pro výrobu závitů. Nástrojem pro tento způsob obrábění je frézovací hlava osazená několika noži. Při obrábění tyčí koná frézovací hlava většinou rotační a posuvný pohyb, u případu řezání závitů koná pouze pohyb rotační, ostatní potřebné pohyby vykonává obrobek [16].



Obr. 4.5 Kinematika okružovacího frézování, obrobek uvnitř nástroje [31].

4.3 Teorie okružovacího frézování závitů

Okružovací frézování závitů je produktivní metoda využívaná často pro výrobu speciálních profilů závitů, u kterých je požadována rychlá výroba s vysokou přesností. Rotační okružování závitů kuličkových šroubů (obr. 4.6) je obrábění zakaleného povrchu hřídele nástroji s profilem závitů s cílem získat přesný výsledný profil a stoupání závitů kuličkových šroubů. Závit je řezán závitořezným prstencem, který se otáčí kolem válcové součásti na jeden průchod nástroje. Tento způsob obrábění je vhodný pro hromadnou i kusovou výrobu kuličkových šroubů. Přesnost vyrobené součásti je ovlivněna přesností okružovacího stroje, kvalitou nástrojů a jejich seřizením. Obvykle se vyrábějí kuličkové šrouby ve třídě přesnosti IT 5 [25, 30].

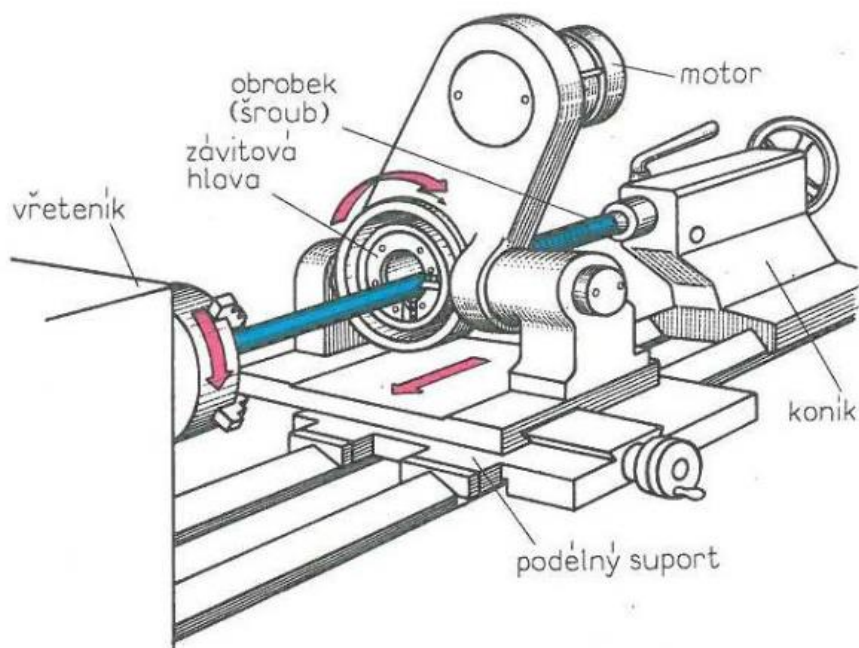


Obr. 4.6 Výroba hřídele kuličkového šroubu vyrobeného okružováním do materiálu v zakaleném stavu [30].

4.4 Stroj pro okružovací frézování závitů

Zobrazení konvenčního stroje pro okružovací frézování závitů na obr. 4.7.

Moderní okružovací stroje mohou vyrábět rotačně symetrické součásti, jako jsou například kuličkové šrouby, za suchého procesu a často s takovou přesností že není potřeba žádné dokončovací broušení. Jedním takovým moderním strojem je Leistritz řady LWN (obr. 4.8), tento stroj řídí posuv rotujících okružovacích nožů v závislosti na požadovaném stoupání vyráběného šroubu [32, 33].



Obr. 4.7 Znáznornění stroje využívaného pro okružovací frézování závitů [31].



Obr. 4.8 Okružovací stroj Leistritz řady LWN [33].

4.5 Výhody okružovacího frézování

Okružovací frézování se jeví jako progresivní metoda obrábění profilu závitu a ostatních rotačních ploch v zakaleném stavu. Tato metoda obrábění sebou přináší spoustu výhod. Mezi ty největší výhody se řadí ekonomická úspora nákladů, protože okružování umožňuje obrábění závitu na jedno upnutí, čímž jsou eliminovány neproduktivní operační časy. Investice je tedy provedena do jednoho stroje, který zvládne téměř všechny operace tvorby profilu závitu, a to v přesnosti IT 5. Další výhodou je úspora času, okružování dokáže odebírat více materiálu na jednu obráběcí operaci, než odebírá broušení to znamená vyšší rychlost výroby. Díky tomu že se provádí více operací při jednom upnutí, dochází k dramatickému snížení doby potřebné pro manipulaci s obrobky. Výhodou je dále zlepšená přesnost, z důvodu obrábění na jedno upnutí se zvyšuje přesnost, hlavně u povrchů obrobku, které jsou funkčně ve vzájemné souvislosti. Další výhodou je dobrá kontrola utváření třísky, tím je umožněno plynulejší a produktivnější obrábění. V neposlední řadě je dobré, že po okružním frézováním nejsou nutné žádné dokončovací operace [25, 33].

ZÁVĚR

Cílem této práce je teoretický rozbor obrábění součástí v zakaleném stavu. Konkrétně dvou metod, a to soustružení a okružovacího frézování. Metoda soustružení kalených ocelí má vysoký potenciál v nahrazení některých brousících operacích po tepelném zpracování materiálu. Okružovací frézování závitů kuličkových šroubů v zakaleném stavu také přináší mnoho výhod, za velmi důležitou je považovaná výhoda zkrácení neproduktivních časů souvisejících s mezioperační dopravou. Obě tyto metody jsou považovány za moderní způsob obrábění.

V této práci je rozebrán konkrétní pohled na tři materiály a to 42CrMo4, 42CrMoS4 a 50CrMo4. U těchto materiálů je zde popsáno jejich chemické složení, mechanické vlastnosti a některé technologické vlastnosti. Další část této práce tvoří rozbor tepelného zpracování, hlavně tedy kalení. Kde je popsán princip a způsob kalení. Po zakalení je občas nutné popouštět, proto je v této kapitole zahrnuto i popouštění. Hlavní část práce tvoří teoretický rozbor soustružení zakalených součástí a teoretický rozbor okružovacího frézování závitů kuličkových šroubů. V kapitole soustružení je popsáno, jak klasické soustružení, tak právě soustružení zakalených součástí. Je zde popsána i vhodná volba soustružnického stroje pro soustružení zakalených součástí, dosažená textura povrchu při tomto způsobu obrábění a některé ekonomické aspekty této metody v porovnání s broušením. Kapitola okružovacího frézování obsahuje teoretický rozbor této metody a její výhody. Dále obsahuje vysvětlení funkčnosti kuličkových šroubů. Také je v této části zahrnut pohled na stroj využívaný pro okružovací frézování.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

zkratka	jednotka	popis
Al ₂ O ₃	[–]	oxid hlinitý
C	[–]	uhlík
Cr	[–]	chrom
HRC	[–]	tvrdost podle Rockwella
KNB	[–]	kubický nitrid boru
Mn	[–]	mangan
Mo	[–]	molybden
NC	[–]	numerical control
P	[–]	fosfor
S	[–]	síra
Si	[–]	křemík
TiC	[–]	karbid titanu
TZ	[–]	tepelné zpracování

symbol	jednotka	popis
A	[%]	tažnost
A _{c1}	[°C]	eutektoidní teplota
A _{c3}	[°C]	teplota překrystalizace austenitu na ferit
A _D	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
A _w	[mm ² ·s ⁻¹]	rychlost vytváření povrchu
C _{Fc}	[–]	materiálová konstanta
C _{Ff}	[–]	materiálová konstanta
C _{Fp}	[–]	materiálová konstanta
D	[mm]	průměr obráběné plochy
F	[N]	celková řezná síla
F _c	[N]	řezná síla
F _f	[N]	posuvová síla
F _p	[N]	radiální síla
KV	[J]	nárazová práce (při V-vrubu)
L	[mm]	délka soustružené plochy
M _s	[°C]	teplota začátku martenzitické přeměny
P _m	[kW]	celkový výkon obráběcího stroje
Q _w	[mm ³ ·mm ⁻¹ ·s ⁻¹]	rychlost úběru materiálu
Q _w '	[mm ³ ·s ⁻¹]	specifická rychlost úběru materiálu
R _a	[μm]	střední aritmetická odchylka průměru
R _e	[MPa]	mez kluzu
R _m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
Z	[%]	kontrakce
a _p	[mm]	šířka záběru ostří
b _D	[mm]	jmenovitá šířka třísky
d	[mm]	průměr obrobené plochy
d _w	[mm]	průměr obrobku
f	[mm]	posuv na otáčku
h _c	[mm]	tloušťka třísky

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

h_D	$[mm]$	jmenovitá tloušťka třísky
k_c	$[MPa]$	měrná řezná síla
l	$[mm]$	délka soustružené plochy
l_c	$[mm]$	délka kontaktu čela nástroje a třísky
l_n	$[mm]$	délka náběhu
l_p	$[mm]$	délka přeběhu
n	$[min^{-1}]$	otáčky
r_ϵ	$[mm]$	poloměr špičky
t_{AS}	$[min]$	jednotkový strojní čas
t_{ASn}	$[min]$	jednotkový strojní čas obrábění při konstantních otáčkách obrobku
t_{ASV}	$[min]$	jednotkový strojní čas obrábění při konstantních řezné rychlosti
v_c	$[m \cdot min^{-1}]$	řezná rychlost
v_e	$[m \cdot min^{-1}]$	efektivní výsledný pohyb
v_f	$[m \cdot min^{-1}]$	posuvová rychlost
v_{ch}	$[m \cdot min^{-1}]$	rychlost odvádění třísky
v_{fr}	$[mm \cdot s^{-1}]$	rychlost posuvu při broušení
x_{FC}	$[-]$	exponent vlivu a_p
x_{Ff}	$[-]$	exponent vlivu a_p
x_{Fp}	$[-]$	exponent vlivu a_p
y_{FC}	$[-]$	exponent vlivu f
y_{Ff}	$[-]$	exponent vlivu f
y_{Fp}	$[-]$	exponent vlivu f
α_o	$[^\circ]$	nástrojový úhel hřbetu v ortogonální rovině
γ_o	$[^\circ]$	nástrojový úhel čela v ortogonální rovině
\emptyset	$[^\circ]$	úhel primární plastické deformace

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] European steel and alloy grades. 42CrMo4 (1.7225), [online], [cit. 2021-05-10].
Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=335
- [2] FÜRBAACHER, I., Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: kovy, plasty, keramika, kompozity. Svazek 3 / Praha: Dashöfer, 2000. 3 sv. (na volných listech). ISBN 80-86229-02-5.
- [3] BOHDAN BOLZANO. Přehled vlastností oceli 42CrMo4, [online], [cit. 2021-05-10].
Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli-42crmo4>
- [4] European steel and alloy grades, 42CrMoS4 (1.7227), [online], [cit. 2021-05-10].
Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=195
- [5] European steel and alloy grades, 50CrMo4 (1.7228), [online], [cit. 2021-05-10].
Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=336
- [6] Saarlust, Material specification sheet Saarlust, 50CrMo4, [online], [cit. 2021-05-10].
Dostupné z: <https://www.saarlust.com/sag/de/allgemein/suche/index.shtml?q=50CrMo4>
- [7] VIRGAMET, 50CrMo4, 1.7228 – ALLOY STEEL, [online], [cit. 2021-05-10].
Dostupné z: <https://virgamet.com/50crmo4-48crmo4-50cd4-aisi-4150-1-7228-alloy-steel>
- [8] MACHEK, V. Nauka o materiálu 3. část, speciální kovové materiály. Praha: České vysoké učení technické, 2008. 118 s. ISBN 978-80-01-04212-0.
- [9] MAZANCOVÁ, E. Technické materiály I. 1 vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2577-9.
- [10] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P. Nauka o materiálu I: NAUKA O KOVECH 4. svazek. 2 vyd. Praha: Nakladatelství československé akademie věd, 1975, 542 s.
- [11] HLUCHÝ, M. a KOLOUCH, J. Strojírenská technologie 1, 1. díl Nauka o materiálu. Praha: Scientia, 2007, 266 s. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [12] PTÁČEK, L., a kol. Nauka o materiálu II. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [13] SKÁLOVÁ, J. Nauka o materiálech. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003, 232 s. ISBN 80-7043-244-6.
- [14] KRAUS, V. Tepelné zpracování a slinování. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013, 270 s. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [15] DAVIM, J. Paulo. Machining of hard materials. London: Springer, 2011, 211 s. ISBN 978-1-84996-449-4.
- [16] KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

-
- [17] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [18] HUMÁR, A. Technologie I – Technologie obrábění – 1. Část. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT – FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2003, 138 s. [online] [cit. 2021-03-08].
Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
- [19] NESLUŠAN, M. Sústruženie kalených ocelí. EDIS – vydavateľstvo Žilinskej univerzity, J. M. Hurbana 15, Žilina, 2009, 253 s. ISBN 978-80-554-104-1.
- [20] TÖNSHOFF, H.K. - ARENDT, C – AMOR BEN, R.: Cutting of hardened steel, CIRP annals, 2000, Vol. 49(2), pp. 547-566.
- [21] Hembrug. Mikroturn 500 x1, [online], [cit. 2021-03-27].
Dostupné z: <https://www.hembrug.com/machine/mikroturn-500-x1/>
- [22] NESLUŠAN, M. Vybrané aspekty presnosti obrovkov pri tvrdom sústružení. In.: Plzeň, 2009, 9 s. [online], [cit. 2021-03-27].
Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16441/1/Neslusan.pdf>
- [23] ROČEK, V. Příručka obrábění, Praha: SNTL, 1973, 227 s.
- [24] VASILKO, K.: Analytická teória trieskového obrábania. Prešov: FVT, 2007, 338 s., ISBN 978-80-8073-759-7.
- [25] SANDVIK COROMANT. Okružní frézování závitů, [online], [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/threading/thread-whirling/pages/default.aspx>
- [26] BRYCHTA, J. Výrobní stroje obráběcí, Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2003, 147 s. ISBN 80-248-0237-6
- [27] KSK Precise Motion, a. s. Kuličkové šrouby: Precise Screw [online], [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.ksk-pm.cz/produkty/precise-screw>
- [28] MAREK, J. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [29] MAREK, J.: Kuličkové šrouby a matice ve stavbě CNC obráběcích strojů, část 1. MM průmyslové spektrum, [online], [cit. 2021-04-28].
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kulickove-srouby-a-matice-ve-stavbe-cnc-obrabecich-stroju-cast-1.html>
- [30] MAREK, J.: Kuličkové šrouby a matice ve stavbě CNC obráběcích strojů, část 2. MM průmyslové spektrum, [online], [cit. 2021-04-29].
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kulickove-srouby-a-matice-ve-stavbe-cnc-obrabecich-stroju-cast-2>
- [31] KUBÍČEK, M. Obrábění: Výroba závitů – shrnutí. Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola technická Brno, Sokolská 1, [online], [cit. 2021-04-29].
Dostupné z: <https://docplayer.cz/369489-Vyroba-zavitu-shrnuti.html>
-

[32] Leistritz, MACHINE TOOLS. Whirling – an economical technology, [online], [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.schleifen-neu-gedacht.com/en/whirling-an-economical-technology/>

[33] MAREK, J.: Kuličkové šrouby a matice ve stavbě CNC obráběcích strojů, část 5. MM průmyslové spektrum, [online], [cit. 2021-04-29].

Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kulickove-srouby-a-matice-ve-stavbe-cnc-obrabecich-stroju-cast-5>